

管径渐缩式静电透镜束流动力学研究

尹毅^{1,2} 张红强² 彭雄刚² 况鹏² 张鹏² 刘福雁² 田丽霞¹ 李润东³
杨鑫³ 曹兴忠² 王宝义²

1(东华理工大学核科学与工程学院 南昌 330013)

2(中国科学院高能物理研究所多学科研究中心 北京 100049)

3(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 电透镜是横向压缩带电粒子束的常用技术手段,在获得高空间分辨、高亮度等高品质聚焦电子束/离子束/正电子束方面发挥着重要作用。针对低能、大束斑带电粒子束的聚焦过程,本文设计了基于管径渐缩式简单电极结构的电透镜聚焦方法,采用SIMION模拟结合电子束实验的方式对该电透镜中涉及的关键技术进行了研究,研究了透镜聚焦效率及聚焦束斑等核心性能的影响因素及分布规律。结果显示:通过合理布局透镜结构和优化电压配置,能够实现对初始大口径电子束的有效压缩,同时确保聚焦效率达到80%以上。本文提出的这种简单电极结构电透镜聚焦方法,具有显著的横向压缩优势,在反应堆正电子源等多束流聚焦场景中具有广泛的应用前景。

关键词 静电透镜, 横向聚焦, SIMION 仿真, 电子束实验, 束斑

中图分类号 TL824

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100201

Beam dynamics study of electrostatic lens with tube diameter gradually decreasing

YIN Yi^{1,2} ZHANG Hongqiang² PENG Xionggang² KUANG Peng² ZHANG Peng² LIU Fuyan²
TIAN Lixia¹ LI Rundong³ YANG Xin³ CAO Xingzhong² WANG Baoyi²

1(School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(Multi-discipline Research Center, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract [Background] The electrostatic lens plays an important role in obtaining high quality focused electron/ion/slow positron beams with high spatial resolution and brightness. A novel electric lens, composed of simplified electrode structures with tube diameter gradually decreasing, is proposed for focusing charged particle beams with low energy and large spot size. [Purpose] This study aims to investigate the beam dynamics of this designed electrostatic lens for validation. [Methods] Based on overall structure of electric lens focusing system, the charged particle optical simulation software SIMION was employed to optimize the parameters of this focusing system. Then combined with electron beam experiments, the key technologies involved in the electronic lens were studied in detail, including influencing factors, their distributions, and the focusing performance of the lens. [Results] The results

国家重点研发计划(No.2019YFA0210002)、国家自然科学基金(No.U1930103, No.12075056)资助

第一作者: 尹毅, 男, 1998年出生, 2020年毕业于三峡大学, 现为硕士研究生, 研究领域为正电子束流技术

通信作者: 刘福雁, E-mail: liufy@ihep.ac.cn; 田丽霞, E-mail: tianlixia@ecut.edu.cn; 杨鑫, E-mail: yangx05@126.com

收稿日期: 2023-04-06, 修回日期: 2023-06-05

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2019YFA0210002), National Natural Science Foundation of China (No. U1930103, No.12075056)

First author: YIN Yi, male, born in 1998, graduated from China Three Gorges University in 2020, master student, focusing on the study of positron beam technology

Corresponding author: LIU Fuyan, E-mail: liufy@ihep.ac.cn; TIAN Lixia, E-mail: tianlixia@ecut.edu.cn; YANG Xin, E-mail: yangx05@126.com

Received date: 2023-04-06, revised date: 2023-06-05

show that the large transverse space of the initial electron beam can be compressed effectively by arranging the electrode structure and electric potential of the lens, with focusing efficiencies exceeding 80%. **[Conclusions]** The focusing method proposed in this study has significant lateral compression advantages with wide application prospects in many focusing scenarios of different charged particle beams, such as reactor positron sources.

Key words Electrostatic lens, Transverse focusing, SIMION, Electron beam experiment, Beam spot

束流是许多带电粒子的集合,其组成粒子的能量、发散角等初始状态影响粒子束的整体状态,为获取高品质束流,多对初始束流进行聚焦。束流聚焦方式通常可分为三种:电透镜聚焦^[1-3]、磁透镜聚焦^[4]以及电磁透镜组合聚焦^[5]。依赖轴对称的非均匀电场或磁场,可改变束流中带电粒子的运动轨迹^[6],使其汇聚或发散。最早的磁透镜在1926年由德国学者Busch提出,其发现具有轴对称结构的磁场可对带电粒子产生聚焦作用^[7],并且采用磁透镜可有效避免聚焦过程中的粒子减速现象,能够有效改善系统时间分辨率。磁透镜的显著特点是聚焦磁场由较大体积线圈提供,并且需要不断耗能。

相比磁透镜,电透镜能耗低,适用于低能带电粒子聚焦;同时,电透镜规模紧凑,方便集成。例如,电子枪中集成的多级静电透镜,可在有限的空间内对热阴极产生的低能电子束进行横向聚焦^[8-11]。不仅如此,电透镜对于荷质比较大的离子,在高空间分辨聚焦上具有独特优势。例如,聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术使用的电透镜能够将离子源发射的离子束精准加速、聚焦至样品表面,从而实现对离子束的超高精度控制,广泛应用于刻蚀、薄膜沉积、表面处理以及半导体微细加工^[12-13]。

在反应堆慢正电子束流场景,也多使用静电透镜对初始束流进行大尺度的横向压缩,如美国北卡罗来纳州立大学PULSTAR正电子源^[14]以及德国NEPOMUC正电子源^[15]。为增大正电子产额,提高中子打靶效率,反应堆慢正电子源普遍采用直径数十厘米的转化靶,导致其反应生成的正电子束横向分布远大于后端谱仪对束斑的要求。因此,往往需要在转化靶后端设置一定的电透镜装置,对初始慢正电子束流进行大幅度的横向聚焦,使其束斑约束在若干毫米的横向空间内,提高束流亮度,同时便于长距离地运输和满足后端谱仪应用需求。

电子枪或离子枪电透镜聚焦系统对带电粒子聚焦能力有限,均为低倍率聚焦;对于大尺度初始束流的静电聚焦除PULSTAR与NEPOMUC外,研究经验较少。为实现大口径初始束流的聚焦运输,本文提出了一种基于简单电极结构的电透镜聚焦方法,并采用SIMION模拟结合电子束实验的方式探究了该方法电透镜中栅极提取位置、聚焦电极间距、电极

电位等因素对聚焦效率(即,聚焦后束流强度与聚焦前束流强度的比值)及聚焦后束斑等重要参数的影响及分布规律,可为该种简易化电透镜的多场景应用提供物理模型和基本结构参数。

1 研究方法

1.1 电透镜聚焦系统介绍

电透镜聚焦系统由带电粒子提取、聚焦以及长距离运输三部分组成,其中提取部分主要由网状栅极提取完成,对于低能带电粒子的聚焦由静电透镜实现,运输部分则由100 Gs螺线管磁场完成^[16-17],带电粒子在磁场中以拉莫尔进动(Larmor Precession)的形式螺旋向前运动^[18]。本文采用的电透镜结构与PULSTAR等装置类似,采用的是多个电极空间渐缩组成的结构,每个电极分别设置静态举电位,使两两电极之间形成轴对称的梯度渐变电场,束流在多级电场的作用下径迹向轴线附近偏折,从而实现束流的横向聚焦。

1.2 电透镜聚焦SIMION仿真

电透镜聚焦系统总体结构,如图1所示,设计过程中使用带电粒子光学模拟软件SIMION对其结构参数进行优化^[19-20]。该软件可计算电场或电磁复合场下带电粒子的动力学过程,同时其在几何定义、用户编程、数据记录和图像可视化方面可为电透镜的输入、输出参数提供良好的交互接口。在电透镜的初始设置中,依次放置的电极1和电极2的内径分别

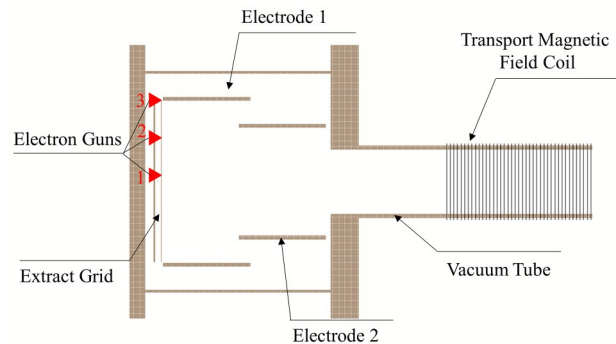


图1 SIMION仿真中电透镜模型结构图
Fig.1 Electric lens model in SIMION simulation

为 150 mm 和 100 mm，长度均为 80 mm，两电极间的相对位置可调；提取栅极位于电极入口附近，由 100 目钨网组成，直径与电极 1 尺寸相同。该钨网组成的提取栅极能具有较高占空比，同时钨材料具有高熔点，不受电子热出射导致高温的影响。模拟中，在运输磁场末端设置有直径 60 mm 的靶对聚焦后的束流进行收集和统计，得到聚焦效率和聚焦束斑尺寸等分析参数。

1.3 实验测量方法

由 SIMION 模拟确定电透镜结构尺寸后，研究中加工制造了一套电透镜实验样机，并基于此设计了电子束聚焦实验以对透镜的聚焦效率、束斑分布等性能和分布规律进行评估。实验中，栅极上等间距共设置了三路电子枪(图 1)以模拟典型位置上的实际束流状态，第一处位于透镜中心轴线上，第三处位于栅极边缘，距轴线 75 mm。为提高电子束传输效率，该样机内部为高真空环境，真空度可达 10^{-5} Pa。

2 结果与讨论

2.1 SIMION 模拟结果

2.1.1 栅极提取位置对聚焦结果的影响

添加提取栅极有利于将电子引出至电透镜的电极结构中，提取栅极合适的电压设置与位置选择是影响电子提取的关键。栅极提取电压设置依据电子自身能量确定，即栅极和电子枪之间的电势差须大于电子自身能量才能有效提取发射的电子。提取栅极与聚焦电镜间的位置由模拟方法优化确定，在模拟中，研究了提取栅极多种位置下的聚焦效果，结果如图 2 所示。图中，电极 1 入口设定为坐标零点，提取栅极位置设置为聚焦电极外(-30 mm、-15 mm、-5 mm、0 mm)或电极内部(5 mm、15 mm)。

图 2 中结果显示，调整提取栅极与聚焦电镜的相对位置，聚焦电场无变化，故聚焦后束斑直径基本保持不变，约为 28 mm，聚焦效率呈现先增大再减小的趋势，并且在提取栅极刚好位于聚焦电镜入口时，聚焦效率达到最大值。这是因为在提取栅极和电透镜电极上均有静电位，调整栅极与电透镜的相对位置，在轴向不同位置上电势分布不断变化，电子束受到的电场力作用方向存在差异；当栅极距离电极有一定距离时，相当数量的电子在电场驱动下由栅极与电极间的狭缝处溢出而无法提取至透镜内致使聚焦效率减少。当栅极位于透镜内部时，在聚焦电场分布影响下，部分粒子难以提取至透镜内部或是碰撞于电极 2 上损失，降低了聚焦效率。

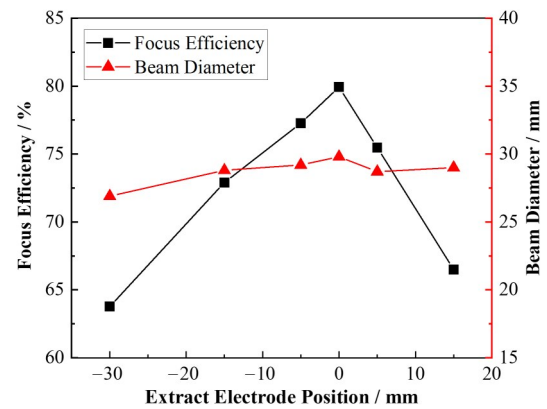


图 2 栅极位置对聚焦结果的影响
Fig.2 Effect of grid position on focusing results

2.1.2 透镜电极间距对聚焦结果的影响

对于本研究中采用的口径渐缩式多电极组成的电透镜，电极间的距离设置影响着聚焦电场分布，直接关系透镜聚焦性能；同时，由于电极连接处存在一定的绝缘间隙，模拟中通过优化电极间距参数，减少了该间隙电子外溢的概率，有效提高了透镜的聚焦效率。研究中，模拟了两电极重叠 10 mm、平齐以及 10 mm、20 mm 间距下透镜的聚焦效果，结果如图 3 所示。

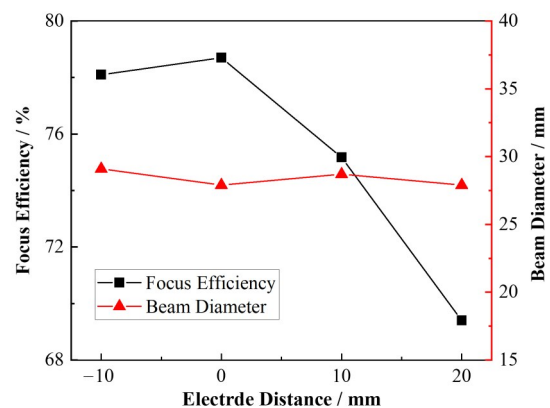


图 3 电极间距对聚焦结果的影响
Fig.3 Effect of electrode distance on focusing results

模拟结果表明，调整电极间距，束流可在电场中平缓过渡，束流聚焦后束斑直径基本一致，均为 27 mm 左右；而聚焦效率随间距增大呈现逐渐减小的趋势，并且在两电极重叠 10 mm 或是平齐时，有较高的聚焦效率。这是由于电极平齐或重叠时，能够明显改善两电极连接处的电场分布，使得电场整体连贯过渡，电子束聚焦轨迹平缓，降低了束流由两电极之间空隙逃逸至外部的概率，从而提高了整体的聚焦效率。

2.1.3 电极初始电位对聚焦结果的影响

合理的电极电压设置是电透镜样机设计中聚焦段研究的重要内容,模拟工作优化设计的重心也是关于静电透镜各电极电压的配置。模拟中,提取栅极置于电镜入口处,且电位与电极1相同,在 $-100 \sim -500 \text{ V}$ 之间调节,输运管道统一设置为地电位;根据电极1电压变化,模拟中对电极2电压进行优化直至束流的聚焦效率最大,相应的不同初始电位与聚焦参数间的关系如图4所示。

比较不同初始电位下聚焦结果,当初始负电位高于 -300 V 时,总体聚焦效率可达80%以上,并且随着初始电压的继续增加,聚焦效率缓慢上升,趋于稳定不变。同时,束流直径不断增大,这是由于电极间聚焦电场随初始电压逐渐增大,导致聚焦后粒子横向速度随之变快,从而使得进入磁场后的旋转半径增大。

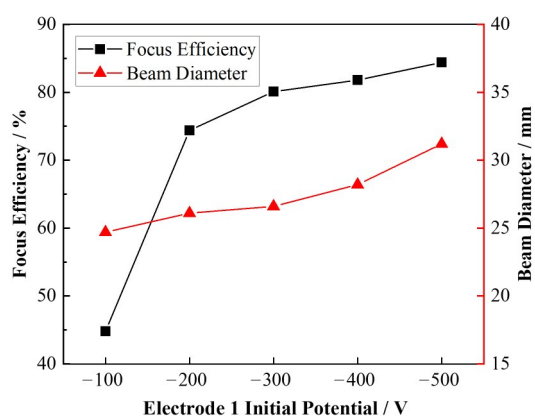


图4 不同初始电位对聚焦结果的影响
Fig.4 Effect of initial potential on focusing results

2.2 电子束实验结果

2.2.1 电透镜电极电位对聚焦效率的影响

根据SIMION模拟确定的结构参数研制了电透镜原理样机,实验中基于此研究了电透镜电极电位设置对电子束聚焦参数的实际影响规律,并且参照实验中的透镜参数设置,同样利用SIMION建模对实验中的研究内容进行了计算分析,结果对照如图5所示。实验和模拟研究中,电极1电位设置为 -300 V ,提取栅极固定为 -315 V 。

结果显示,实验和模拟中的聚焦效率随电极电位的变化趋势基本一致,都呈现先增大再减小的规律,在电极2电位为 -225 V 时,聚焦电场最佳,聚焦效率的实验值和模拟值均达到最大值。而模拟与实验效率数值差异主要由于在模拟中初始束斑为直径 150 mm 面源,而实验中设置电子在不同位置处以点

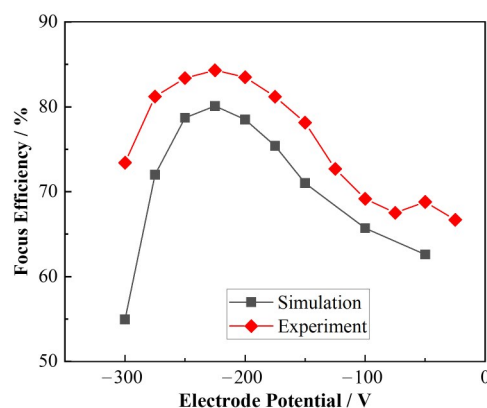


图5 电极2电位对聚焦效率的影响
Fig.5 Effect of electrode 2 potential on focusing efficiency

源的方式出射,各处效率对应权重存在差异,图5中以各处电子枪对应面积权重为比例计算实验聚焦效率。此外,为有效收集聚焦电子束,同时排除传输路径中感应静电的干扰,在实验中靶上添加有正电位,可对电子形成一定的吸引势。因此,电子的实验收集效率要略高于模拟值。

针对不同位置出射的电子束,实验中分别对其聚焦效率进行了对比分析,见图6。可以看出,调整两电极电位时,中心位置电子枪的聚焦效率高,而边缘位置处的聚焦电场相对较弱,导致其相同电位下的聚焦效率有所减小。调节电极1在 $-300 \sim -200 \text{ V}$ 之间变化时,聚焦电势差减小,因此,三个位置处电子束对应的收集效率均呈现出逐渐减少的态势;当电极1电位为 -200 V ,绝对值小于电极2的 225 V 电势时,聚焦电场不能建立,反而将电子不断减速,因此未在靶上收集到电子。

2.2.2 电透镜电极电位对束斑位置分布影响

实验中使用以ITO导电玻璃为基底均匀附着ZnS:Cu粉末制作了荧光靶观察聚焦电子束的束斑形态,并使用CCD相机(ATIK 420 mono)对束斑分布进行了记录,例如,图7为束斑在荧光靶上形态与位置分布,图中计数为对应位置处的束斑亮度。可以看出,使用CCD相机可清晰记录束斑形貌,束斑在荧光靶上有明显的区域分布。由于出射电子分布的不均匀性导致束斑计数最大区域不在束斑的几何中心,但在实验分析中均采用束斑几何中心作为聚焦后束斑的中心,以真实反映束斑形态分布。

电透镜聚焦电极上电位配置对于束斑分布具有显著影响,为探究电极电位对束斑位置分布的影响规律,在实验中分别调节了电极1和电极2的电位,并相应统计两路电子束聚焦后的束斑相对位置变化。实验中电极调节方案为:电极2设置为

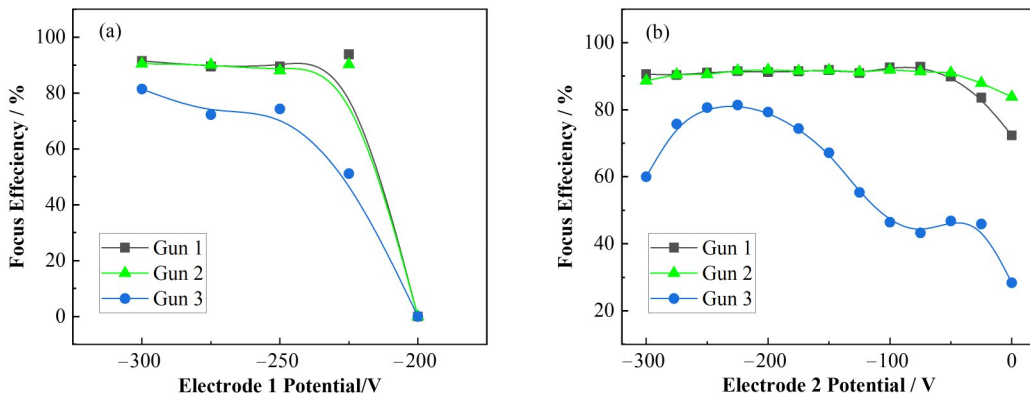


图6 电极电位对不同位置电子束聚焦效率影响
Fig.6 Effect of electrode potential on electron beam focusing efficiency at different positions of electron guns

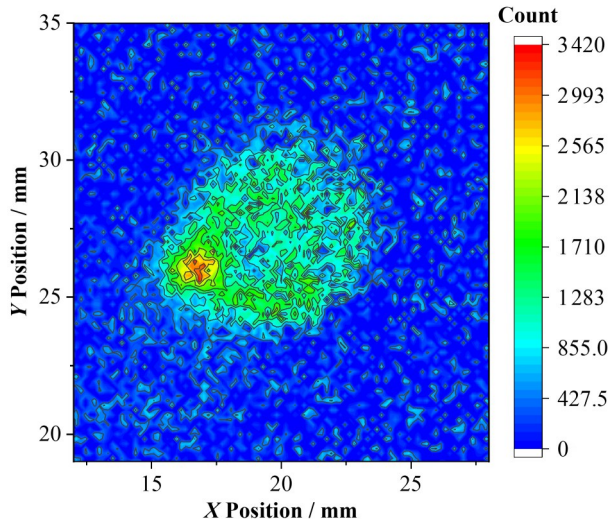


图7 CCD记录束斑形态
Fig.7 Morphology of beam spots recorded by CCD

-225 V时, 电极1在-320 ~ -200 V间调整; 电极1初始电位设置为-300 V时, 电极2电位在-320 ~ 0 V间调整, 对应的两束斑分布如图8所示。

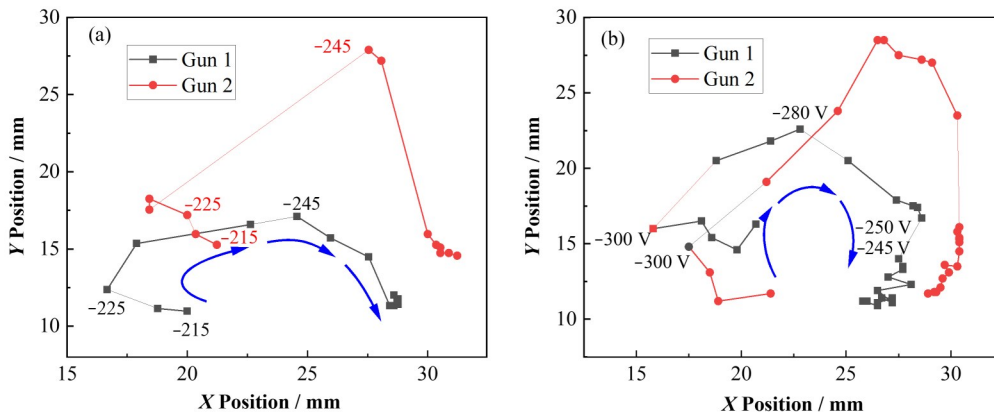


图8 分别调节电极1 (a)和电极2 (b)电位时, 束斑位置分布
Fig.8 Beam spot distribution of different guns while adjusting potential of electrode 1 (a) and electrode 2 (b)

可以看出, 无论是调节任何一个电极电位, 束斑均呈现出向聚焦电势差增大的方向进行转动。这是由于调整电位时电子束在透镜中受到的聚焦电场不同, 导致其进入螺线管磁场的时刻不同, 从而在磁场中拉莫进动轨迹上产生相位差, 故调整电极电位时两束斑均可回旋移动。而调整电极电位使得聚焦电场电势差增大时, 电子进入磁场时间逐渐提前, 因此电子束斑随电势差增大呈现顺时针方向移动的规律。

图9为调整电极电位后两束斑间距的变化规律, 可以看出, 出射两电子束轨迹受聚焦电场影响, 两者的束斑距离基本呈现先增大后减小的趋势, 并且存在极大值。为充分压缩整体束斑的尺寸, 应尽可能地减小电子枪束斑间的距离, 即要求电极电压选取时应避开图9中极大值区域对应的电势。同时, 透镜电压选取时, 还应结合考虑束流的聚焦及输运效率等关键参数, 例如, 综合考虑聚焦能力和聚焦效率, 本文中透镜试验装置的两个电极电位最优值分别选为-300 V和-225 V。

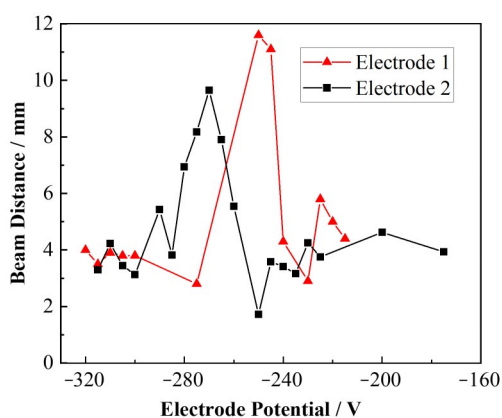


图9 调整电极电位时两个束斑间距的变化
Fig.9 Variation of distance between two beam spots when adjusting electrode potential

3 结语

本文采用 SIMION 软件模拟及电子束实验的方法开展了圆筒型管径渐缩式静电透镜聚焦带电粒子束时动力学过程、影响因素及其规律分布等关键技术的研究。研究表明:针对低能、大口径粒子束的聚焦,电透镜聚焦效率、束斑形貌等性能与其提取栅极、电极位置、电位配置等因素密切相关,在透镜栅极以及多电极位置重合或稍有重叠时能够实现对束流的大幅度横向压缩,并且基于电透镜样机的电子束实验对透镜的聚焦性能完成了原理验证。同时研究发现,电透镜的聚焦效果受电极结构、电位配置以及输运磁场协同影响,实际电极设置需综合考虑聚焦效率和束斑聚焦目标进行优化确定。本文中研究的这种简单圆筒电极结构电透镜在反应堆正电子源等其他低能、大束斑粒子束流聚焦场景可充分发挥其横向压缩优势,而且该透镜结构紧凑、便于拼接的特点也可进一步拓展其在其他领域的应用。

作者贡献声明 尹毅负责仿真和实验,文章撰写及修改;张红强、彭雄刚负责实验方案设计,数据分析;况鹏负责仿真及实验指导;张鹏负责实验平台搭建;刘福雁负责研究方法指导,文章审阅修改;田丽霞负责实验指导,项目支持;李润东负责设计加工指导;杨鑫负责粒子动力学理论指导及软件支持;曹兴忠负责文章框架指导,项目支持;王宝义负责方法设计,文章框架指导,项目支持。

参考文献

- Trubitsyn A A, Grachev E Y, Tarabrin D Y. Focusing of charged particles by electric field lenses with a pulsed voltage source[J]. *Technical Physics Letters*, 2016, **42**(4): 384 - 386. DOI: [10.1134/s1063785016040167](https://doi.org/10.1134/s1063785016040167).
- Sise O, Ulu M, Dogan M. Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, **554**(1 - 3): 114 - 131. DOI: [10.1016/j.nima.2005.08.068](https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.068).
- 朱美强, 石晓倩, 唐瓦, 等. 高能量大束流氩离子枪的研发[J]. *核技术*, 2021, **44**(9): 090401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090401).
ZHU Meiqiang, SHI Xiaoqian, TANG Wa, *et al.* Development of high energy and high flux argon ion gun [J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44**(9): 090401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090401).
- Mikage H, Kitagawa M, Wada M. Development of a magnetic quadrupole lens for low energy heavy ion beam transport[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(1): 015107. DOI: [10.1063/1.5128580](https://doi.org/10.1063/1.5128580).
- 杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
DU Bingchu, WANG Jianru. *Electron optics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- Saitou Y. Motions of dust particles in a complex plasma with an axisymmetric nonuniform magnetic field[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, **23**(1): 013709. DOI: [10.1063/1.4940944](https://doi.org/10.1063/1.4940944).
- 唐腾飞, 刘海浪, 岳高, 等. 高能电子束电磁透镜的研究进展[J]. *真空科学与技术学报*, 2022, **42**(10): 719 - 725. DOI: [10.13922/j.cnki.cjvst.202205009](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202205009).
TANG Tengfei, LIU Hailang, YUE Gao, *et al.* Research progress of high energy electron beam electromagnetic lens[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, **42**(10): 719 - 725. DOI: [10.13922/j.cnki.cjvst.202205009](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202205009).
- Quan H, Tao H, Hu Y L, *et al.* Fast optimization design of the electron Gun with EOS[C]//2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). April 19-21, 2016, Monterey, CA. IEEE, 2016: 1 - 2. DOI: [10.1109/IVEC.2016.7561909](https://doi.org/10.1109/IVEC.2016.7561909).
- Nehra A, Sharma R K, Kumar D, *et al.* Effect of thickness and radial position of aperture in a pole piece in focusing of multibeam electron gun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, **40**(6): 1672 - 1677. DOI: [10.1109/TPS.2012.2192504](https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2192504).
- Li Y, Wen Z, Wang X X, *et al.* A sheet beam electron gun with high compression ratio and long transmission distance performance for W-band TWT applications[J].

- IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, **49**(2): 734 - 741. DOI: [10.1109/TPS.2021.3051162](https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3051162).
- 11 王岩, 赵伟霞, 邓晨晖, 等. 二维混合结构网格电场数值模拟及其在低能电子枪设计中的应用[J]. 真空科学与技术学报, 2020, **40**(1): 1 - 6. DOI: [10.13922/j.cnki.cjovst.2020.01.01](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2020.01.01).
- WANG Yan, ZHAO Weixia, DENG Chenhui, *et al.* Design optimization of low energy electron gun: a simulation study with hybrid mesh model[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, **40**(1): 1 - 6. DOI: [10.13922/j.cnki.cjovst.2020.01.01](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2020.01.01).
- 12 Fritzsche M, Muecklich A, Facsko S. Nanohole pattern formation on germanium induced by focused ion beam and broad beam Ga⁺ irradiation[J]. Applied Physics Letters, 2012, **100**(22): 223108. DOI: [10.1063/1.4721662](https://doi.org/10.1063/1.4721662).
- 13 周长庚, 柯建林, 邱瑞. 脉冲离子束流聚焦装置的研制[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(4): 687 - 690. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.04.0687](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.04.0687).
- ZHOU Changgeng, KE Jianlin, QIU Rui. Development of focusing device used in pulse ion beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(4): 687 - 690. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.04.0687](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.04.0687).
- 14 Moxom J, Hathaway A G, Hawari A I. Out of core testing of the North Carolina State University PULSTAR reactor positron beam[C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. October 26 - November 3, 2007, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2008: 2343 - 2348. DOI: [10.1109/NSSMIC.2007.4436615](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4436615).
- 15 Hugenschmidt C, Ceeh H, Gigl T, *et al.* The upgrade of the neutron induced positron source NEPOMUC[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, **443**: 012079. DOI: [10.1088/1742-6596/443/1/012079](https://doi.org/10.1088/1742-6596/443/1/012079).
- 16 Wang G B, Li R D, Qian D Z, *et al.* Physical models and primary design of reactor based slow positron source at CMRR[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2018, **427**: 38 - 43. DOI: [10.1016/j.nimb.2018.04.022](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.04.022).
- 17 Hawari A I, Gidley D W, Moxom J, *et al.* Operation and testing of the PULSTAR reactor intense slow positron beam and PALS spectrometers[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, **262**: 012024. DOI: [10.1088/1742-6596/262/1/012024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/262/1/012024).
- 18 Zhao Q, Fan B L, Wang S G, *et al.* A vector atomic magnetometer based on the spin self-sustaining Larmor method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, **481**: 257 - 261. DOI: [10.1016/j.jmmm.2019.03.025](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.025).
- 19 Lai H, McJunkin T R, Miller C J, *et al.* The predictive power of SIMION/SDS simulation software for modeling ion mobility spectrometry instruments[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2008, **276**(1): 1 - 8. DOI: [10.1016/j.ijms.2008.06.011](https://doi.org/10.1016/j.ijms.2008.06.011).
- 20 Ganesh C L, Santosh K, Renuka M, *et al.* Design of an electrostatic ion trap and time-of-flight tube using SIMION software[J]. ECS Transactions, 2022, **107**(1): 18859 - 18866. DOI: [10.1149/10701.18859ecst](https://doi.org/10.1149/10701.18859ecst).